

APORTACION AL ESTUDIO DE LAS CARACTERISTICAS TERMOFISICAS DE LOS MATERIALES HOMOGENEOS (*)

(CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF HOMOGENEOUS MATERIALS)

José Luis Esteban Sáiz,
Dr. Ingeniero Industrial
IETcc/CSIC

Director de tesis:
Juan Antonio de Andrés y Rodríguez-Pomatta
Dr. Ingeniero Industrial

609-1

RESUMEN

Los diferentes materiales empleados en la edificación, durante su utilización, están sometidos a diversas condiciones climáticas, que son variables según la ubicación.

Con el fin de homogeneizar su comportamiento, se estableció una zonificación española según cuatro niveles, en función del nuevo concepto físico definido como tensión-día.

Por otra parte, se han estudiado diversos métodos dinámicos de transmisión de calor en régimen transitorio. También se ha diseñado y comprobado experimentalmente un procedimiento adecuado para la determinación de las características termofísicas de los materiales, principalmente los aislantes. Estas características se obtienen en función del porcentaje de humedad incorporado a su estructura para llegar, finalmente, al establecimiento de funciones polinómicas, que expresen la variación de dichas propiedades térmicas.

SUMMARY

The different materials used in construction are submitted to diverse climatic conditions which are variable according to their location.

On the purpose to homogenize their behaviour, a four level Spanish zoning was established, in function of the new physical concept defined as day-stress.

By other hand, new dynamic methods of heat transfer in transitional regime has been also designed and experimentally tested a suitable proceeding to determine the thermophysical characteristics of the materials, mainly those with insulating properties. Such characteristics are obtained according to the humidity percentage embedded in its structure, finally reaching the establishment of polynomic functions, which would express the variation of those thermal properties.

1. ESTRUCTURA DE LA TESIS

El desarrollo general del trabajo elaborado puede apreciarse en el diagrama de flujos que se indica en la figura n.º 1 (pág. siguiente).

De la apreciación de este esquema se pueden observar las distintas partes fundamentales de que consta, cada una de las cuales tiene un posterior desarrollo de forma más amplia.

Seguidamente, sin entrar en detalle, vamos a tratar algunos puntos más significativos.

2. CAPTACION DE HUMEDAD

El comportamiento de las propiedades termofísicas de los materiales utilizados en la edificación tiene una gran influencia a la hora

de valorar el ahorro energético; indudablemente, en aquellos materiales cuyas funciones están encaminadas a oponer una mayor resistencia al paso del calor a través de ellas, como son los materiales aislantes, la repercusión en el ahorro energético es más notable.

Se ha podido observar, sobre probetas de diversos materiales aislantes, obtenidas en edificaciones existentes y con distintos años de antigüedad, cómo han experimentado un aumento de porcentaje de humedad, debido fundamentalmente a los fenómenos de difusión de vapor de agua, que se producen entre las dos caras del material aislante. En algunos casos, para materiales como el poliestireno expandido, se han obtenido valores significativos del orden del 17 % en volumen.

La incorporación de humedad en el material aislante hace crecer la concentración de partículas de agua en la propia estructura, creando una serie de puentes térmicos que facilitan notablemente el paso de calor;

(*) Tesis doctoral leída en marzo de 1985, en la E.T.S. de Ingenieros Industriales de la Universidad Nacional de Educación a Distancia. Calificación obtenida: Apto cum laude.

ESQUEMA GENERAL DEL TRABAJO

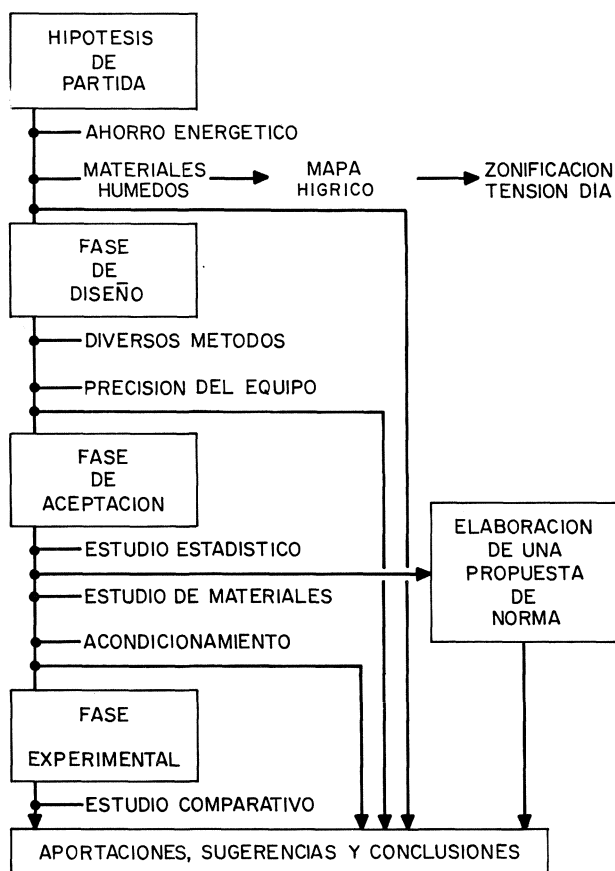


Fig. 1

tengamos en cuenta que el valor del coeficiente de conductividad térmica del agua es de 0,58 W/mK, mientras que el del aire inmóvil o de otro producto, tal como CO₂, freón, etc., es del orden de 0,024 W/mK.

Al considerar el fenómeno de transmisión de humedades como un sistema dinámico, tendremos que tener en cuenta todas las condiciones ambientales de confort en el interior de los edificios, tanto en verano como en invierno, así como las distintas condiciones higrotérmicas ambientales, estableciéndose generalmente en invierno un movimiento de vapor de agua del interior al exterior de gran intensidad y, por el contrario, del exterior al interior, más reducido en verano.

Analizando los datos higrotérmicos de un total de 47 observatorios meteorológicos, referentes a un periodo de tiempo variable, comprendido entre 5 y 10 años, se llegó a una zonificación en función del nuevo concepto tensión-día, definiéndose como la suma de los distintos $|\Delta P|$ que se producen entre las condiciones higrotérmicas ambientales y las de confort interno, a lo largo de cada día tipo mensual, durante un año.

Las cuatro zonas consideradas han sido las siguientes:

- ZONA A < 400 mbar-día
- ZONA B de 400 a 800 mbar-día
- ZONA C de 800 a 1.200 mbar-día
- ZONA D > 1.200 mbar-día

las cuales pueden apreciarse en la figura n.º 2.

Por lo tanto puede establecerse un comportamiento análogo del material aislante dentro de cada una de las zonas. Es indudable que la incorporación de materiales aislantes en la edificación, dentro de la zona D, requiere un especial cuidado por los problemas que se pueden ocasionar, debido a la disminución del coeficiente de conductividad térmica y a otros secundarios, tales como heladicidad y envejecimiento.

Este punto abre una nueva vía de trabajo, mediante el establecimiento, dentro de los distintos puntos de la zonificación tensión-día, de casetas experimentales donde se puedan cuantificar los incrementos de humedad ocasionados, en función del tiempo.

Sin embargo, el contenido de humedad absorbido por los materiales aislantes no tendría repercusión, bajo el punto de vista energético, mientras no existiese un procedimiento fiable de evaluación de las características termofísicas en esas condiciones.

3. METODOS DE EVALUACION

En el campo de la edificación, una de las constantes térmicas más características a la hora de la determinación de las cargas térmicas, problemas de condensación, puentes térmicos, etc., es la conductividad térmica de los materiales empleados, sobre todo si el estudio únicamente se considera en régimen permanente; en el caso que el análisis se realice en régimen transitorio, empiezan a intervenir otros factores, tales como inercia térmica, amortiguamiento, desfase, admitancia, difusividad, etc., para los cuales hay que tener en cuenta, además, el calor específico del material.

Desde principios del siglo se han venido utilizando métodos de ensayo en régimen permanente y, entre todos, cabría destacar el de Poensgen (fotografía n.º 1), también llamado de la placa caliente protegida, puesto que con él se obtienen valores reproducibles y con una gran precisión, del orden del 2,5%.

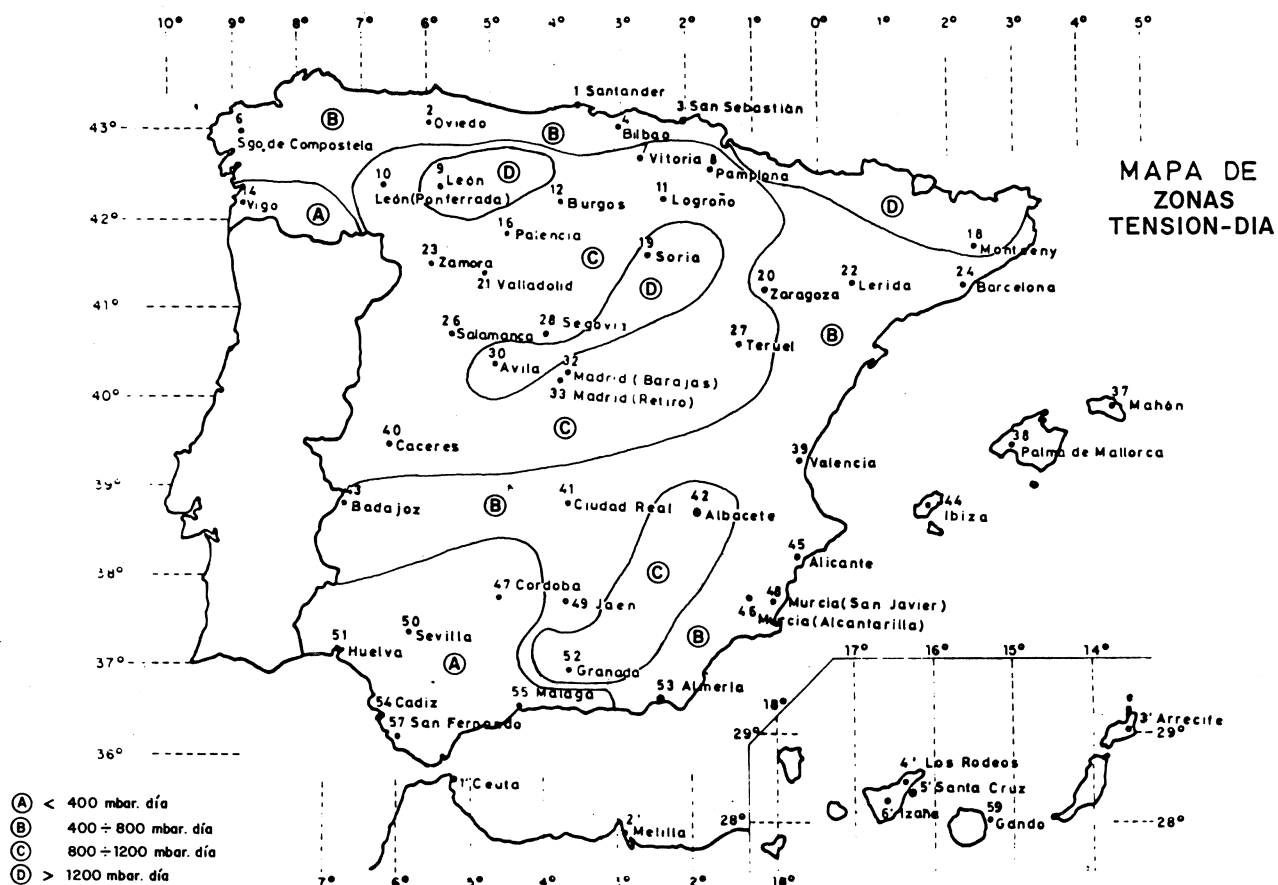
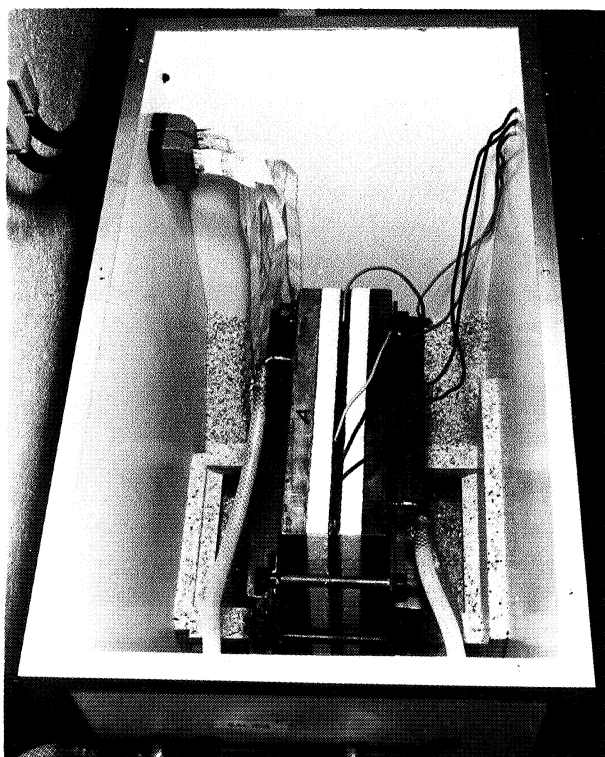


Fig. 2



Fotografía n.º 1.

Este método, con ligeras modificaciones de disposición de las placas, bien sean horizontales o verticales, es el comúnmente adoptado por los distintos países en sus normas nacionales [en el caso de España y para materiales celulares, queda indicado en la Norma UNE 53037 (70)], así como a nivel de normativa internacional, quedando recogido en las Normas A.S.T.M. C-177, DIN 52612 y NF X10021, entre otras.

Sin embargo, adolecen de poca agilidad y versatilidad, al igual que otros métodos de ensayo en régimen permanente. Por tal motivo se comenzaron a estudiar otros métodos de valoración de los denominados «dinámicos» que, en la actualidad, son bastante empleados.

Los primeros trabajos sobre estos métodos fueron llevados a cabo sobre el año 1940, por el profesor Veron, así como por Cammerer y de Vries, los cuales comenzaron a estudiar diversos procedimientos en los que tenían en cuenta el porcentaje de humedad de los materiales, así como la rapidez del procedimiento.

Los métodos «dinámicos» realizados cuando la transmisión de calor está todavía en régimen

transitorio, a través de la probeta, están basados principalmente en dos modelos perfectamente diferenciados.

Si contemplamos la figura n.º 3, en la cual están representados los cuatro modelos más significativos, podemos observar lo siguiente:

- en los modelos (a) y (b) un flujo de calor constante incide sobre una de las superficies, estando la opuesta o bien completamente aislada (superficie adiabática), o bien a una temperatura constante (superficie isoterma), y en los modelos denominados (c) y (d) existe una superficie isoterma y la posterior con aislamiento perfecto, a temperatura constante.

Estos métodos, que tienen como principal característica la realización en régimen no permanente, poseen un tiempo de ejecución muy pequeño, variable de 5 a 60 minutos, en comparación con los de régimen sí permanente, cuya duración es de bastantes horas. También pueden obtenerse determinaciones en probetas, con una determinada humedad, cuando la elevación de temperatura sea muy pequeña, para que de esta forma no se provoque un movimiento apreciable de humedad, debido a las diferentes tensiones de vapor existentes a cada lado de la probeta.

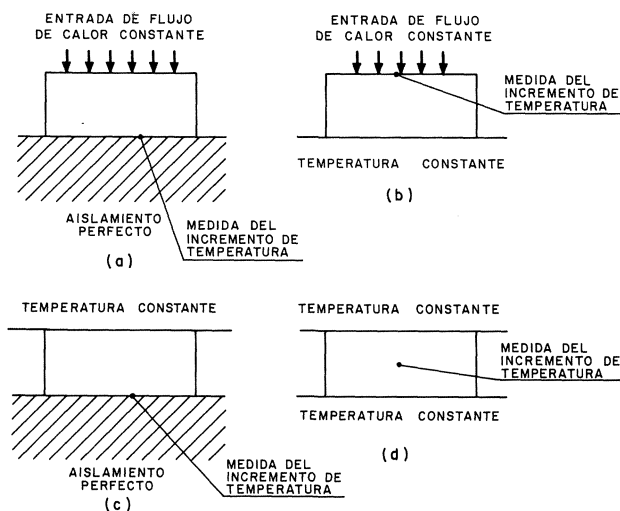


Fig. 3.-Diversos sistemas de métodos dinámicos.

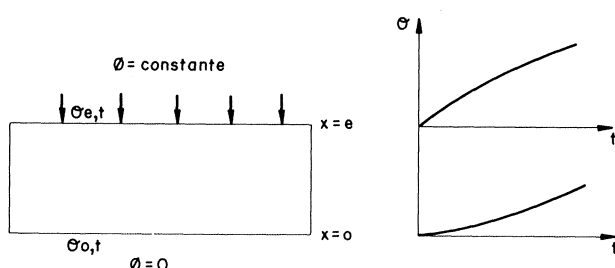


Fig. 4.-Distribución de temperaturas.

Para la determinación del calor específico, el método más comúnmente empleado es el calorimétrico, aunque para los materiales de construcción este valor tiene pequeñas diferencias entre los distintos materiales; sin embargo, con la utilización de los sistemas dinámicos, se puede determinar simultáneamente este valor.

Dentro de estos cuatro sistemas los más empleados en la actualidad son aquellos que utilizan como fundamento básico el esquema (d), y en menor escala se emplean los de los esquemas (a) y (b).

Un análisis general, tanto teórico como experimental de los distintos procedimientos indicados, nos condujo a la elección del sistema representado como «a», del que se estudiaron algunos procedimientos basados en determinaciones gráficas.

El fundamento teórico de este procedimiento está basado en la ecuación general de transmisión de calor por conducción, en ausencia de fuentes internas de energía y considerando un sólido semi-infinito y flujo térmico unidireccional.

Para este caso se pueden establecer las siguientes condiciones de contorno, de acuerdo con lo indicado en la figura n.º 4:

- Condición inicial de distribución de temperaturas:
para $t = 0$ $\theta (\theta \leq x \leq e) = \text{constante}$
- Condición de contorno de segunda especie:
a partir del tiempo inicial $t > 0$ se aplica, sobre una de las superficies del material $x = e$, un flujo de calor constante y uniformemente repartido de densidad \varnothing .

Aplicando la ecuación de Fourier para los planos $x = e$ y $x = 0$, tendremos:

$$\varnothing = \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (1)$$

$$0 = \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (2)$$

En los planos intermedios $0 < x < e$ tendremos, de acuerdo con la ecuación general de conducción de calor:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \gamma \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (3)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones diferenciales (1) (2) y (3), se llega a la siguiente solución:

$$\theta_{x,t} = \frac{\varnothing \cdot e}{\lambda} \left[\frac{\gamma}{e^2} t - \frac{1}{6} + \frac{x^2}{2e^2} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \cos \frac{n \pi x}{e} \left(\exp \left(-n^2 \pi^2 \frac{\gamma t}{e^2} \right) \right) \right] \quad (4)$$

4. CALCULO DE LAS CONSTANTES TERMOFISICAS

Para un instante determinado $t > 0$, el salto térmico entre ambas caras de la probeta será:

$$\Delta \theta = \theta_{e,t} - \theta_{0,t} = \frac{\varnothing \cdot e}{\lambda} \left[\frac{1}{2} - \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+2)^2} \exp \left(- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{\gamma t}{e^2} \right) \right] \quad (5)$$

Para más valores del módulo de Fourier.

$Fo = \frac{\gamma \cdot t}{e^2}$ suficientemente grande, es decir, para tiempos grandes, con lo que puede suponerse régimen cuasi-constante, la serie exponencial puede desprejarse, ya que tiende a cero, quedando:

$$\Delta \theta = \frac{\varnothing \cdot e}{2 \cdot \lambda} \quad (6)$$

de donde obtendremos los valores de

$$\lambda = \frac{\varnothing \cdot e}{2 \cdot \Delta \theta}$$

El cálculo de C_p y γ se obtiene mediante derivación y posteriores simplificaciones, llegándose finalmente a las expresiones siguientes:

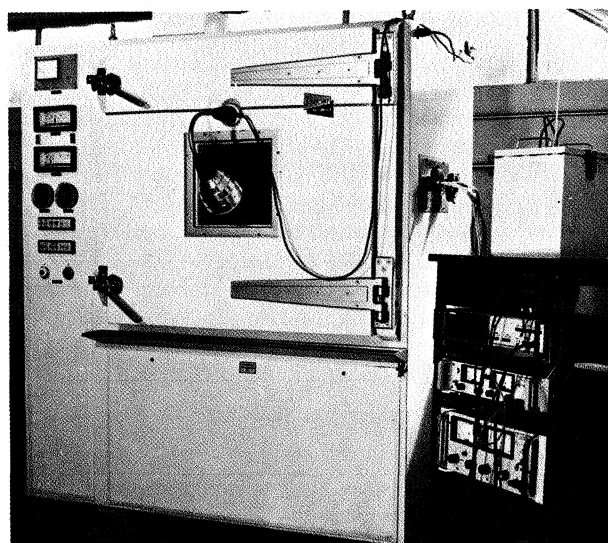
$$C_p = \frac{\varnothing}{\rho \cdot e \frac{\partial \theta}{\partial t}} \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{e^2}{2 \Delta t} \quad (8)$$

5. EQUIPO EXPERIMENTAL

Para poder trasladar los criterios teóricos a un desarrollo práctico se tuvieron en cuenta ciertas premisas tales como:

- El flujo térmico que proporciona el elemento calefactor se deberá repartir por igual en ambos sentidos, ascendente y descendente, para lo cual es necesario un apilamiento de probetas con una disposición simétrica respecto a dicho elemento.
- El elemento calefactor deberá ser de tipo laminar, con el fin de conseguir una capacidad térmica mínima.



Fotografía n.º 2.

- La creación de un flujo nulo la podemos obtener con un gran aislamiento térmico, o bien mediante la anulación de los vectores de igual módulo, pero de sentidos opuestos, así como los trabajos efectuados por Auquez (1), Kriescher (2) y Pratt (3), sobre sistemas dinámicos.

Llegando finalmente al banco de ensayo, representado en la fotografía n.º 2, éste se halla compuesto por las siguientes unidades:

- Unidad de apilamiento de probetas.
- Unidad calefactora.
- Unidad acondicionadora.
- Unidad captadora de temperaturas.
- Unidad de adquisición y proceso de datos.

Sobre cada una de estas unidades componentes se llevó a cabo un estudio de los distintos medios instrumentales, elementos y fenómenos físicos alteradores de la precisión del equipo en conjunto, llegándose en función

de la densidad del material a considerar a los valores siguientes:

DENSIDAD	ERRORES RELATIVOS		
Kg/m ³	λ (%)	C_p (%)	γ (%)
≤ 25	3,24	3,45	1,61
> 25	2,61	2,86	1,61

6. FASE EXPERIMENTAL

La fase experimental se llevó a cabo con un total de 21 materiales, alguno de los cuales era el mismo producto pero con distinto espesor, comúnmente utilizados en la edificación, dentro del campo de los materiales aislantes.

En esta fase estaba una primera etapa de comprobación de la bondad del equipo, en comparación con otros métodos reconocidos en diversas normativas internacionales en estado seco (A.S.T.M. C-177, D.I.N. 52612 e I.S.O. 2581, así como las variaciones de las características termofísicas, en función de la densidad del material o del espesor de la probeta para pasar, seguidamente, a procesos de captación de humedad de los distintos materiales, bien mediante fenómenos de



Fotografía n.º 3.

capilaridad con acondicionamiento continuado en estado húmedo a 20° C y 90% de H.R., o bien en aquellos casos donde el porcentaje de células cerradas del material es grande provocando esta captación de humedad por fenómenos de difusión de vapor de agua, mediante la realización de una cámara climática de doble atmósfera, consiguiendo un ambiente en una de las caras del material de 40° C y 90% de H.R. y en la otra de 10° C y 90% de H.R. (mediante un sistema de placas refrigeradoras en contacto íntimo con las probetas, según puede apreciarse en la fotografía n.º 3). Esto representaba un salto global de presiones parciales entre ambas caras, de 55,4 mbar, provocándose de forma acelerada una gran acumulación acuosa en el interior de los materiales.

Un aspecto de la cámara puede apreciarse en la figura n.º 5.

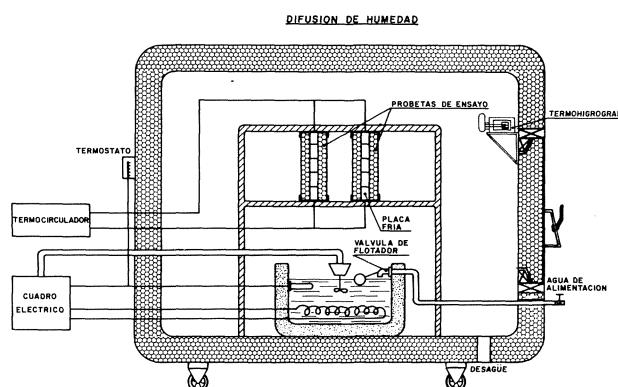


Fig. 5.-Esquema de montaje del banco de ensayo.

7. DETERMINACION DE LAS CONSTANTES TERMOFISICAS

Como aplicación del sistema experimental analizado fueron efectuados numerosos ensayos con los materiales seleccionados previamente, de donde se obtuvieron las variaciones de las características termofísicas en función del contenido de humedad incorporada.

Un aspecto general de las variaciones de las propiedades termofísicas (λ , C_p , γ), en función del porcentaje de humedad en volumen y peso, puede apreciarse para el caso concreto del aglomerado de polieter de densidad 200 kp/m³ (D-200) en la figura n.º 6, cuyas variaciones responden a las siguientes ecuaciones:

– Coeficiente de conductividad térmica (W/mk):

$$\lambda_x = 0,0488 + 0,0871 x - 0,0055 x^2$$

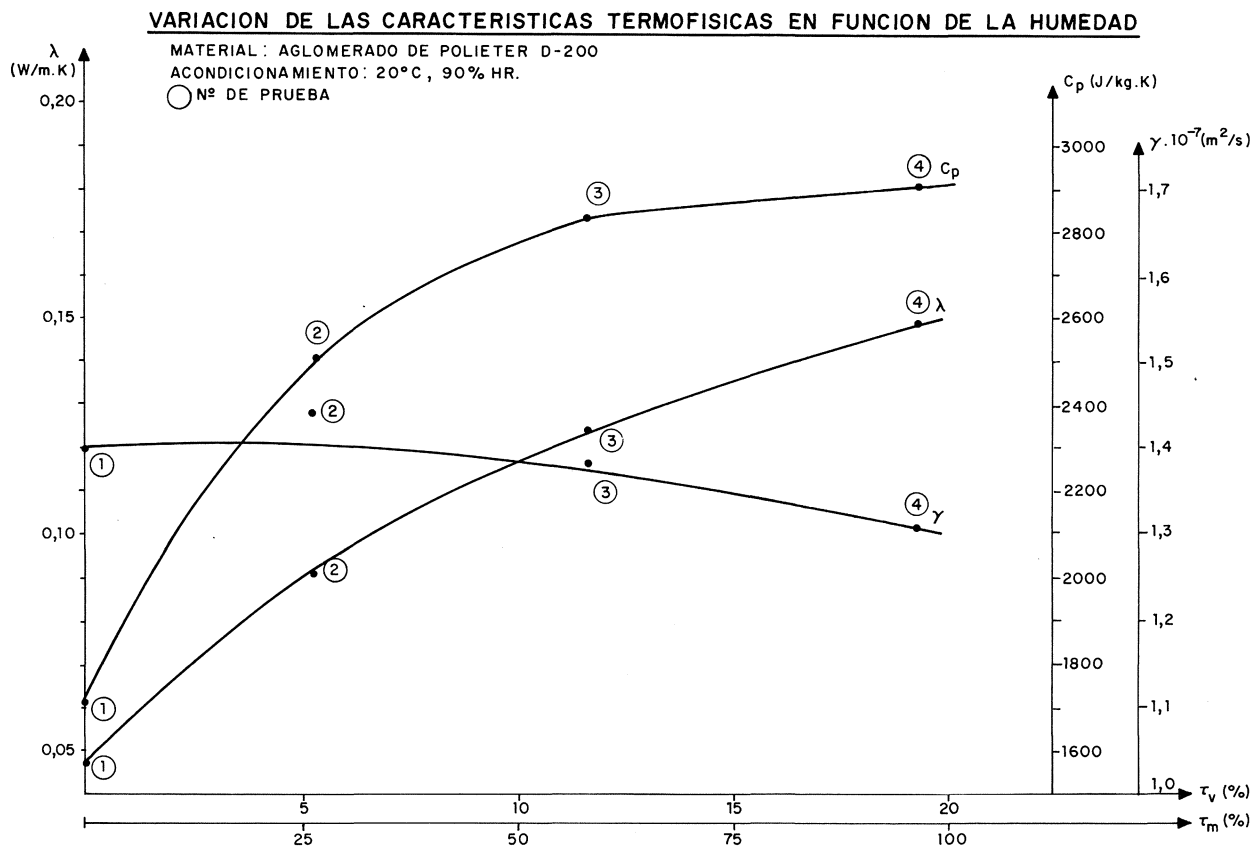


Fig. 6.

– Calor específico (J/kg · k):

$$C_{px} = 1.748,416 + 159.943 x - 0,0055 x^2$$

– Difusividad térmica (m²/s):

$$\gamma_x = (1,408 + 0,00533 x - 0,0055 x^2) 10^{-7}$$

donde x es el porcentaje de humedad en volumen.

En la figura n.º 6 puede apreciarse el incremento notable de λ y C_p , que se experimenta al aumentar el porcentaje de humedad, lo que tiene una gran repercusión con referencia al ahorro energético.

Por lo tanto, el establecimiento de una correlación entre los ensayos naturales y los acelerados, realizados mediante la aplicación de la cámara de doble ambiente, conduciría a la determinación de unos coeficientes de mayoración, que dependerían fundamentalmente del material considerado y de la zona tensión-día donde fuese aplicado.

BIBLIOGRAFIA

1. Auquez, J.: «Mesure instantanée de la conductivité thermique». Cahier du C.S.T.B., n.º 519. 1963.
2. Kriecher, O.: «Messung der Wärmeindringzahl, der Wärmeleitzahl und der spez. Wärme von Kunztharzprebmassen bei näherungsweise konstanter temperatur». Sonderdruck ans VDI-Zeitschrift. Bd. 100.
3. Prat, A. W. and Ball, J. E.: «Thermal conductivity of Building Materials. Methods of determinations and results». Journal of the Institution of Heating and Ventilating Engineers. 1956.
4. Paljak, S.: «Condensation in Slabs of cellular plastics». Matériaux et Construction. 1973.
5. Abgrall, M. et Padet, J.: «Etude par différences finies du transfert de chaleur instantanée dans un mur: évaluation des erreurs et choix d'un maillage». Revue Générale de Thermique. 1982.
6. Ball, G. B.; Healey W. G. and Partington, J. B.: «The Thermal conductivity of isocyanate-based rigid cellular plastics: Performance in Practice». Cellular Plastics. 1978.
7. Elroy/Tye Mc.: «Thermal insulation performance». American Society for Testing and Materials. STP 718. 1980.

* * *